

УДК 504.3.054+504.064.2

© С.З. Полищук, В.Ю. Каспийцева

ПРОГНОЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ ОТ МОЩНЫХ ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Приведена численно-аналитическая схема для расчета распространения вредных примесей, выбрасываемых в атмосферу совокупностью точечных источников заданной интенсивности. Проведена оценка достоверности полученных результатов исследований. Рассчитан показатель обеспечения надежности выполнения санитарно-гигиенических нормативов.

Приведена чисельно-аналітична схема для розрахунку розповсюдження шкідливих домішок, що викидаються в атмосферу сукупністю точкових джерел заданої інтенсивності. Проведена оцінка достовірності отриманих результатів досліджень. Розрахований показник забезпечення надійності виконання санітарно-гігієнічних нормативів.

A numeral-analytical chart is resulted for the calculation of distribution of harmful admixtures, thrown out in an atmosphere the aggregate of point sources of the set intensity. The estimation of authenticity of the got results of researches is conducted. The index of providing of reliability of implementation of sanitary-hygenic norms is expected.

Вступление. Решение задач прогноза антропогенного загрязнения атмосферного воздуха при планировании и застройке территорий в настоящее время базируется на теоретических и экспериментальных исследованиях по аэродинамике атмосферы.

Одно из направлений исследований в этой области состоит в разработке теории атмосферной диффузии на основе математического описания распространения загрязнения (примесей в воздухе) с помощью решения уравнения турбулентной диффузии. Оно позволяет исследовать распространение примесей от источников различного типа при разных характеристиках среды и дает возможность использовать параметры турбулентного обмена, применяемого в метеорологических задачах о тепло- и влагообмене в атмосфере. Это обстоятельство весьма существенно для практического использования результатов теории к прогнозированию загрязнения воздуха с учетом ожидаемого изменения метеорологических условий [1-3].

Цель исследований. В общем случае решение этой задачи подразумевает расчет поля скоростей (уравнения Навье-Стокса) и расчет поля концентраций (уравнение диффузии) в нестационарной и трехмерной постановке [2]. Поэтому разработка эффективных численно-аналитических и аналитических методов решения этой задачи для практической реализации на ПЭВМ представляет значительный интерес. В данной статье рассмотрены методы конструирования вычислительных алгоритмов методом прямых. Поскольку поле концентраций накладывается на механическое течение среды и их можно рассматривать раздельно, то поле скоростей в последующем анализе предполагается заданным.

Изложение основного материала исследований. Для составления региональной математической модели рассмотрим общее уравнение турбулентной диффузии примесей в пространстве

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + u_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} + u_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} - (u_r - u_g) \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \sigma \varphi = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \sum_{k=1} q_k \delta(x - x_k) \delta(y - y_k) \delta(z - z_k), \end{aligned} \quad (1)$$

где φ - концентрация примеси, мг/м³; u_x, u_y, u_z - составляющие вектора скорости \vec{u} , м/с; u_g - скорость гравитационного осаждения частиц примеси, м/с; σ - коэффициент самопроизвольного распада частиц примеси, 1/с; D_x, D_y, D_z - составляющие вектора коэффициента турбулентной диффузии \vec{D} , м²/с; q_i - интенсивность k -го точечного источника примеси, мг/с; $\delta(x-x_k), \delta(y-y_k), \delta(z-z_k)$ - дельта-функция Дирака.

Начальные и граничные условия для уравнения (1) запишем в следующем виде

$$\varphi|_{t=t_0} = \varphi_0(x, y, z), \quad (2)$$

$$D_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} = g_w(t, x, y), \quad \varphi|_{z \rightarrow +\infty} = 0, \quad (3)$$

$$\varphi = 0 \quad \text{при} \quad y \rightarrow \pm\infty, \quad (4)$$

$$\varphi = 0 \quad \text{при} \quad x \rightarrow \pm\infty. \quad (5)$$

Расчетную область, соответствующую атмосфере региона, представим в виде параллелепипеда. Начало декартовой системы координат совместим с левым задним ребром, заданным осью z . В качестве геометрических параметров расчетной области примем $x \in [0, x_L), y \in [0, y_L), z \in [0, z_L)$, где x_L, y_L, z_L - характерные линейные параметры, считающиеся заданными. Аппроксимации граничных условий (2)-(4) при $z \rightarrow +\infty, y \rightarrow \pm\infty, x \rightarrow \pm\infty$ отображаются на границы конечной расчетной области методом прямых [5], что обеспечивает их прозрачность. Объем параллелепипеда покрывается сеточной областью в виде прямоугольных ячеек, где каждой узловой точке (β, j, i) приписываются соответственно координаты z, y и x .

Итак, пусть расчетная ячейка построена и совокупность узлов шаблона некоторым образом упорядочена. Для такой ячейки нам предстоит написать расчетные формулы, аппроксимирующие уравнение (1) системой обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ), имеющих форму двухточечных краевых задач [3]. Задачу (1)-(4) при этом удобно привести к эквивалентной форме без δ -функции в правой части уравнения (1). В окрестности сеточного узла (β, j, i) , где размещен k -тый источник Q_k , по каждому координатному направлению, используя предположение об ограниченности решения во всей области определения, введем условия

$$\left. \begin{aligned} \varphi_+ = \varphi_-, \quad y = y_j, \quad x = x_i \\ D_z \frac{\partial \varphi_+}{\partial z} - D_z \frac{\partial \varphi_-}{\partial z} + Q_k = 0 \end{aligned} \right\} \quad \text{при} \quad z = z_p, \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_+ = \varphi_-, \quad z = z_p, \quad x = x_i \\ D_y \frac{\partial \varphi_+}{\partial y} - D_z \frac{\partial \varphi_-}{\partial y} + Q_k = 0 \end{aligned} \right\} \text{при } y = y_j, \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_+ = \varphi_-, \quad z = z_p, \quad y = y_j \\ D_x \frac{\partial \varphi_+}{\partial x} - D_x \frac{\partial \varphi_-}{\partial x} + Q_k = 0 \end{aligned} \right\} \text{при } x = x_i, \quad (8)$$

Условия (6)-(8) справедливы и для любой расчетной области. В зависимости от ее характера они выражают либо непрерывность искомых функций по самим функциям и ее градиентам, либо непрерывность искомых функций и разрыв ее градиентов там, где расположен источник загрязнения.

Процесс переноса и диффузии субстанции φ в такой постановке рассмотрим для случая одномерной задачи и общего нестационарного случая.

Одномерный случай. Имеем уравнение

$$u \frac{d\varphi}{dx} + \sigma\varphi = D \frac{d^2\varphi}{dx^2} + Q\delta(x - x_0), \quad (9)$$

где скорость потока воздушных масс задана и $u > 0$ [2]. Кроме этого на прямой $-\infty < x < +\infty$ заданы условия

$$\left. \begin{aligned} \varphi|_{x \rightarrow +\infty} = 0 \\ \varphi|_{x \rightarrow -\infty} = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

В [2] решение задачи (9), (10) разбивается на два решения φ_{\pm} для областей $-\infty < x < x_0$, $x_0 < x < +\infty$, связь которых осуществляется с помощью соотношения (8). Окончательно решение представляется в виде

$$\varphi(x) = \frac{Q}{\sqrt{4\sigma D_x + u^2}} \begin{cases} \exp\left(-\left(\sqrt{\frac{\sigma}{D_x} + \frac{u^2}{4D_x^2}} - \frac{u}{2D_x}\right)(x - x_0)\right), & x \geq x_0, \\ \exp\left(-\left(\sqrt{\frac{\sigma}{D_x} + \frac{u^2}{4D_x^2}} - \frac{u}{2D_x}\right)(x - x_0)\right), & x \leq x_0. \end{cases} \quad (11)$$

Из анализа результатов, которые сравниваются с точным решением (11), следует, что погрешность численно-аналитической аппроксимации методом прямых практически не зависит от шага дискретизации, а аппроксимация граничных условий при $x \rightarrow \pm\infty$ обеспечивает в граничных узлах расчетной области $x \in [a, b]$ их прозрачность. Это объясняется, по-видимому, тем, что передача информации между узлами сеточной области при таком подходе реализуется с порядком аппроксимации $\sim \infty$. Кроме этого, построенный на основе точного решения дискретный аналог уравнения (9) не имеет каких-либо дефектов и в трактовке конвекции по принципу транспортности.

Нестационарный случай. Для построения экономичных схем в случае трех измерений использовалась неявная продольно-поперечная схема расщепления, позволяющая многомерную задачу свести к цепочке одномерных [3]. Уравнению в частных производных (1) на отрезке $t_{n-1} \leq t \leq t_n$, ($n = 1, 2, \dots$) ставится в соответствие система обыкновенных дифференциальных уравнений (СДУ) в форме двухточечных краевых задач

$$Y''(\xi) - \frac{1}{2} A(\xi)Y'(\xi) - B(\xi)Y(\xi) = f(\xi), \quad (12)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \xi &= (z, y, x), \\ Y(\xi) &= \{\varphi(z, y_j, x_i), \varphi(z_p, y, x_i), \varphi(z_p, y_j, x)\} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

- обобщенные переменные.

Таким образом, если для аппроксимации уравнений (12), включающих неизвестные величины лишь в одном направлении - попеременно по z , y и x , воспользоваться методом прямых, то получим возможность построения экономичных разностных схем с хорошей адекватностью к непрерывным моделям и в этом случае. Характерной особенностью метода прямых в постановке (12) является неоднородность СДУ, что вызывает необходимость построения совокупности частных решений. В связи с этим отметим, что проще всего этот вопрос решается в классе полиномиальных функций, представляемых в виде Тейлоровских аппроксимаций различной размерности по пространственным координатам.

Рассмотренные примеры численно-аналитической дискретизации были использованы для создания комплексов программ, ориентированных на решение конкретных пространственных задач прогнозирования изменений в окружающей среде Приднепровского региона.

Оценка достоверности полученных результатов исследований была выполнена на основе модели визуализации и прогноза полей загрязнений атмосферного воздуха [4]. Данная модель обеспечивает возможность оперативного контроля спрогнозированного загрязнения и оценку состояния атмосферного воздуха по данным измерений при решении задач экологической безопасности (как по времени, так и по координатам места территории).

Контроль и координация за выполнением мероприятий “Программы улучшения экологического состояния Днепропетровской области за счет уменьшения загрязнения окружающей среды основными предприятиями-загрязнителями на 2008–2015 годы”, направленные на уменьшение негативного влияния выбросов в атмосферный воздух остаются одними из приоритетных направлений работы в области охраны окружающей среды. В Программу вошли 25 основных предприятий-загрязнителей Днепропетровской области, таким образом, Программа охватывает около 95 % техногенной нагрузки на всю территорию области.

Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух контролируются от 613 стационарных источников выбросов на 125 предприятиях области, в том числе на 16 экологически опасных объектах. Согласно данным статистики за последнее десятилетие валовые выбросы вредных веществ в атмосферу г. Днепропетровска менялись в диапазоне от 162 тыс. т/год до 187 тыс. т/год [5].

Анализ данных многолетних наблюдений городской санитарно-эпидемиологической службы и гидрометеоцентра на стационарных и маршрутных постах наблюдений свидетельствуют о достаточно установившемся характере значений приземных концентраций загрязняющих веществ и систематическом превышении установленных нормативов допустимых концентраций (ПДК) по 9 веществам: сернистый ангидрид, диоксид азота, оксид углерода, формальдегид, пыль, аммиак, фенол, сероводород, свинец.

Величины максимальных концентраций, полученные по данным измерений приведены в таблице 1. Обобщенные показатели экспериментальных данных по загрязнению атмосферного воздуха Днепропетровска представлены в таблице 2.

Таблица 1

Максимальные значения концентраций (доли ПДК) по данным измерений гидрометеоцентра на стационарных постах наблюдений г. Днепропетровска

Вещество	Месяц года											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
пыль	1,0	2,0	3,0	2,2	3,0	4,0	1,6	2,2	1,8	1,4	1,8	1,0
СО	2,6	1,0	1,0	1,2	1,0	1,2	1,6	1,6	1,6	1,4	1,2	1,8
NO ₂	0,5	0,5	0,6	0,7	0,6	0,5	0,7	0,6	0,8	0,6	0,6	0,3
NO	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,8	0,5	0,3	0,2
фенол	0,9	1,3	1,2	1,8	1,1	1,9	2,4	1,5	1,7	1,7	1,2	1,0
аммиак	0,7	0,5	0,4	0,5	0,5	0,9	0,9	0,8	0,5	0,4	0,4	0,5
формальдегид	0,4	0,5	0,5	0,7	0,6	1,7	0,6	1,6	1,0	0,5	0,3	0,4
сероводород	2,4	3,1	4,4	1,6	1,4	1,9	4,9	4,6	2,5	1,9	2,1	0,9

Таблица 2

Показатели загрязнения атмосферного воздуха г. Днепропетровска

Показатели	Загрязняющие вещества						
	пыль	СО	NO _x	фенол	аммиак	формальдегид	сероводород
Максимальная концентрация, доли ПДК	4,0	2,6	0,8	2,4	0,9	1,7	4,9
Количество превышений ПДК, %	26,2	32,6	-	8,4	4,2	18,3	16,9

Как видно из приведенных данных, значения максимальных концентраций по 8 наиболее критичным загрязнителям изменяются в диапазоне от 0,8 ПДК до 4,9 ПДК, а количество превышений ПДК - до 32,6%. Таким образом, очевидно, что для оценки качества атмосферного воздуха по данным экспериментальных измерений следует учитывать не только качественные показатели (кратность превышения ПДК), но и количественные (число превышений ПДК).

Показатель обеспечения надежности выполнения санитарно-гигиенических нормативов *H* будет иметь следующую структуру:

$$H = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_{in}}{N_{iu}} \cdot \frac{C_{imax}}{\text{ПДК}_i} \right), \quad (14)$$

где N_{in} - число проб i -го вещества, для которых превысился норматив ПДК $_i$; N_{iu} - число отобранных проб по i -му веществу; C_{imax} - максимальное зафиксированное значение приземной концентрации i -го загрязнителя; n - количество загрязнителей, для которых наблюдается превышение ПДК.

Для условий г.Днепропетровска:

$$\begin{aligned} H &= 1 - \frac{1}{5} (4,0 \cdot 0,262 + 2,6 \cdot 0,326 + 2,4 \cdot 0,084 + 1,7 \cdot 0,183 + 4,9 \cdot 0,169) = \\ &= 1 - \frac{1}{5} (1,098 + 0,848 + 0,202 + 0,03 + 0,828) = 1 - 0,596 = 0,404 \end{aligned}$$

Соответственно, показатель риска от загрязнения атмосферного воздуха:

$$R = 1 - H = 0,596 .$$

Если бы ни по одному из веществ, выбрасываемых в атмосферу, не было превышения норматива ПДК, то значение риска $R=0$, а значение показателя обеспечения надежности выполнения санитарно-гигиенических нормативов - $H = 1$.

Выводы. Таким образом, полученные значения показателя H свидетельствуют о низком качестве атмосферного воздуха, далеко от благополучного.

С данной экспериментальной оценкой хорошо согласуются и результаты оценки качества атмосферного воздуха г. Днепропетровска и области, по методике, изложенной в данной статье. Отличительной особенностью данной методики является возможность прогнозирования изменения качества атмосферного воздуха с помощью интегральных показателей при различных сценариях развития территории.

Список литературы

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии загрязнения атмосферы.-Л.: Гидрометеиздат, 1974.-448 с.
2. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды.-М.:Наука, 1982.- 320 с.
3. Самарский А.А. Теория разностных схем.-М.:Наука, 1982.- 459 с.
4. Каспийцева В.Ю. Методология прогноза и визуализации полей показателей загрязнения атмосферного воздуха по данным измерений / Азаров В.С., Долодаренко В.А., Чернобровкина Н.А., Щирский В.А. // Сб.науч.тр. "Опыт моделирования при решении задач природопользования и экологии". - Днепропетровск, 1998.- С.90-100.
5. Статистичний щорічник Дніпропетровської області за 2013 р. -Дніпропетровськ: Державна служба статистики, 2014.-447 с.

Рекомендовано до публікації д.т.н. Голінком В.І.
Надійшла до редакції 25.01.2015